

Список использованных источников

1. Платонов О.И., Васильев Ю.В., Рябко А.Г., Цемехман Л.Ш. // Цветные металлы, 2004, №2, с. 71.
2. Расчеты по металлургии меди и никеля / Б.П. Бледнов, В.Е. Дулынева. – Красноярск, 2004. – 120 с.
3. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с.
4. Тозик В.М., Данилов М.И., Потанаев В.А. // Цветные металлы, 2006, №11, с.19.

УДК 669.187.2:621.365.2:662.612.321/322

И. В. Глухов, Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Плесакин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ДСП-120 ПРИ ЗАГРУЗКЕ И НАГРЕВЕ СЛОЯ ШИХТЫ

Аннотация

Выполнены статистический анализ и материальный баланс дуговой сталеплавильной печи (ДСП) емкостью 120 т для выплавляемой стали 35ГС при завалке шихтовых материалов двумя и тремя корзинами. В зависимости от насыпной плотности шихты оценены ее допустимый объем и масса при условии порционного заполнения рабочего пространства печи. Для загружаемых шихтовых материалов определены теплофизические свойства (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) с учетом насыпной плотности и доли в загрузке. Рассчитан коэффициент теплоотдачи в объеме слоя шихты с учетом тепловыделения от сжигания природного газа, окисления углерода кокса свободным кислородом газовой среды и оксида железа и угара шихты.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, шихта, насыпная плотность, теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи.

Abstract

The statistical analysis and material balance of an arc steel melting furnace (EAF) with a capacity of 120 tons for the melted steel of 35GS with filling of charge materials with two and three baskets are performed. Depending on the bulk density of the charge, its permissible volume and mass are estimated, provided that the working space of the furnace is partially filled. For loaded charge materials, the thermophysical properties (thermal conductivity, heat capacity, thermal diffusivity) are determined taking into account the bulk density and the share in the charge. A technique is proposed for calculating the heat transfer coefficient from the products of combustion of natural gas to the surface of a layer of charge materials.

Keywords: electric arc furnace, batch, bulk density, thermal conductivity, thermal diffusivity, heat capacity, heat transfer coefficient.

Современную дуговую сталеплавильную печь (ДСП) следует рассматривать как комбинированный тепловой объект, в котором совместно используют различные энергоносители: электрическую энергию, газообразное топливо (природный газ), окислитель (кислород) и твердое топливо (кокс) [1, 2]. Нагрев и расплавление шихты происходит за счет тепловыделения в электрической дуге, в факеле продуктов сгорания природного газа, при окислении углерода кокса свободным кислородом газовой среды и оксидами металлов и угара шихты.

Рассмотрим работу современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 тонн при выплавке стали 35ГС. Эксплуатационные показатели работы печи при загрузке шихтовых материалов двумя и тремя корзинами приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели работы ДСП-120 при загрузке шихты двумя и тремя корзинами

Масса железосодержащей шихты, т	Число корзин	Масса годного металла, т	Угар по жидкому/ по годовому, %	Продолжительность плавки, мин	Продолжительность плавки под током, мин	Удельный расход ПГ, м ³ /т шихты	Удельный расход ПГ, м ³ /т годного	Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т шихты	Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/т годного	Удельный расход кислорода, м ³ /т шихты	Удельный расход кислорода, м ³ /т годного	Температура стали из ДСП, °С
141,30	2	129,16	6,3/8,6	51,6	40,8	6,07	6,64	332,68	364,26	36,24	39,70	1631
140,29	3	129,17	7,8/7,9	54,0	40,6	6,13	6,66	340,97	365,98	36,61	39,78	1637

Анализ данных таблицы показывает, что завалка шихты тремя корзинами повышает продолжительность плавки на 4,7 % с одновременным увеличением удельного расхода природного газа на 0,99 %, электроэнергии на 2,49 % и кислорода на 1,02 % в расчете на одну тонну загружаемых материалов. Избежать ухудшения технико-экономических и эксплуатационных показателей процесса плавки возможно только при организации загрузки не более чем двумя корзинами. По нашему мнению, такой режим работы печи возможно реализовать, во-первых, при условии жесткого контроля насыпной плотности загружаемых железосодержащих компонентов шихты, и, во-вторых, при рационально используемом рабочем объеме печи.

Материальный баланс технологического процесса ДСП-120 при выплавке стали 35ГС представлен в табл. 2. При составлении баланса учитывали, что металлосодержащая часть шихты по чистоте (засоренность примесями по массе до 1–1,5 %) и категориям стального лома, скрапа, слитков соответствовала маркам 2А и 3А по ГОСТ 2787-85. Количество загружаемых корзин две при отсутствии «болота». Для расчета принимали плотность природного газа ρ_0^r 0,726 кг/м³ и кислорода ρ_0^k 1,43 кг/м³.

Таблица 2

Материальный баланс технологического процесса печи ДСП-120 при выплавке стали 35ГС

Компонент	Корзина 1 (К-1)	Корзина 2 (К-2)	За плавку, т	%
Масса лома, т (л)	75	65	140 (95,5%)	90,47
- легковесный лом (лл), т	31,5 (38,7%)	27,3 (42%)	58,8 (40,11%)	38,00
- тяжеловесный лом (тл), т	43,5 (53,4%)	37,7 (58%)	81,2 (55,39%)	52,47
Известь (СаО), т	4,8 (5,9%)	0	4,8 (3,2%)	3,10
Кокс (к), т	1,69 (2,0%)	0	1,69 (1,16%)	1,09
Углерод (у), т	0	0,1	0,1 (0,07%)	0,06
Итого твердой массы, т	81,49 (100%)	65,1 (100%)	146,59 (100%)	94,72
Природный газ (ПГ), м ³ / т	382/0,277	401/0,291	783/0,568	0,38
Кислород (О ₂), м ³ / т	1930/2,76	3374/4,825	5304/7,585	4,90
Общая масса, т	84,527	70,216	154,743	100,00

Объем шихтовых материалов в первой корзине $V_{ш}^1$, определенный через их массу $m_{ш}^1$ и насыпную плотность ($\bar{\rho}_{ш}^n = 1489,6$ кг/м³) составил 54,71 м³.

На схеме (рис. 1) показаны основные зоны рабочего пространства, расположенные в продольном сечении между внутренней поверхностью стены и условной плоскостью вблизи электродов.

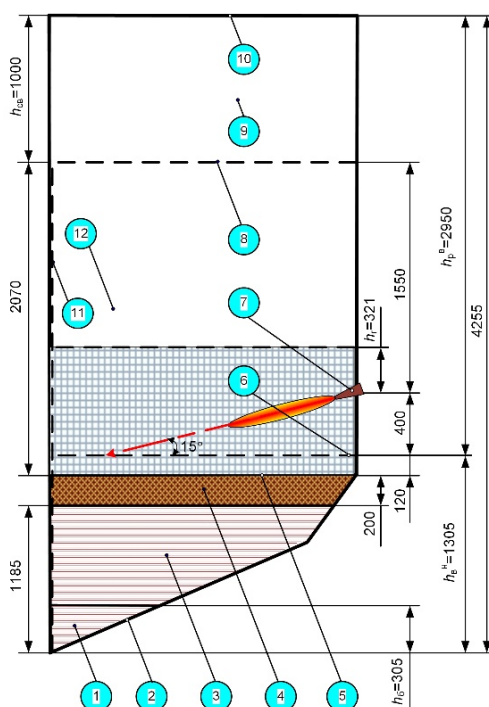


Рис. 1. Схема расположения жидкого расплава и шихтовых материалов в рабочем объеме печи:

- 1 – «болото»; 2 – контур продольного сечения рабочего пространства ДСП-120;
 3 – слой жидкого металла (стали); 4 – слой шлака; 5 – зеркало ванны;
 6 – уровень порога завалочного (технологического) окна; 7 – уровень установки ГКГ и КГ;
 8 – уровень засыпи шихты; 9 – свободный объем над уровнем засыпи шихты;
 10 – верхняя кромка рабочего пространства печи; 11 – условная поверхность, ограничивающая объем прямого теплового воздействия электрических дуг на шихту и расплав; 12 – активный объем рабочего пространства от уровня засыпи до дна подины

Газокислородные горелки (ГКГ) и комбинированные горелки (КГ) располагаются в шихте на глубине $h_r = 321$ мм (см. рис. 1). Таким образом, в активном теплообмене с продуктами сгорания природного газа принимает участие 49,2 % от общей массы шихты первой корзины. Весь активный объем рабочего пространства будет заполнен шихтовыми материалами первой корзины при условии их насыпной плотности $0,82 \text{ т/м}^3$. В этом случае в активном теплообмене с продуктами сгорания будет принимать участие уже 72,4 % от массы шихты. Полную загрузку шихтовых материалов на плавку (массой 146,59 т) можно осуществить и одной корзиной при их насыпной плотности $1,46 \text{ т/м}^3$.

После загрузки шихты в печь первой корзины основной задачей становится нагрев железосодержащих компонентов до температуры, при которой происходит их усадка, позволяющая произвести завалку второй корзины. Загруженный в рабочее пространство печи слой шихты состоит из материалов с весьма различными теплофизическими свойствами. В последующих расчетах используем усредненные свойства шихты в целом, причем для каждого компонента определяется значение величины с учетом его массовой доли [3–5].

Примем, что начальная температура загружаемых материалов составила $t_{\text{нач}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. После завалки основной части шихты необходимо нагреть ее до температур порядка $1350\text{--}1150 \text{ }^\circ\text{C}$, тогда при содержании углерода от 0,8 до 2,0 % металл становится пластичным

[6]. Средний коэффициент теплопроводности шихтовых материалов в первой корзине с учетом газовой среды (см. табл. 2):

$$\bar{\lambda}_{\text{ш}}^1 = 0,01(m_{\text{лл}} \bar{\lambda}_{\text{лл}} + m_{\text{тл}} \bar{\lambda}_{\text{тл}} + m_{\text{и}} \bar{\lambda}_{\text{и}} + m_{\text{к}} \bar{\lambda}_{\text{к}} + m_{\text{пг}} \bar{\lambda}_{\text{пг}} + m_{\text{O}_2} \bar{\lambda}_{\text{O}_2}) = 29,301 \text{ Вт/(м·К)}, \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}_{\text{лл}} = \bar{\lambda}_{\text{тл}} = 31,8$, $\bar{\lambda}_{\text{и}} = 0,82$, $\bar{\lambda}_{\text{к}} = 0,19$, $\bar{\lambda}_{\text{пг}} = 0,1387$, $\bar{\lambda}_{\text{O}_2} = 0,066$ – соответственно средний коэффициент теплопроводности компонента по данным [7] при температуре $\bar{t} = 575$ °С для легковесного и тяжеловесного лома (принят равным), извести, кокса, природного газа и кислорода, Вт/(м·К).

Эффективную теплопроводность слоя шихтовых материалов с учетом порозности после загрузки первой корзины определим по формуле, предложенной А. Миснаром [3]:

$$\bar{\lambda}_{\text{ш}}^{\text{сл}} = \bar{\lambda}_{\text{ш}}^1 \left(1 + \frac{v_{\text{ш}}}{1 - v_{\text{ш}}^{0,33}}\right), \text{ Вт/(м·К)}, \quad (2)$$

где $v_{\text{ш}}$ – относительное содержание твердых компонентов в шихте, доли ед.; $(1 - v_{\text{ш}})$ – порозность слоя загруженной шихты, доли ед.

Для рассматриваемых выше условий загрузки и порозности слоя загруженной шихты $v_{\text{ш}}^{\text{п}} = 0,8$ эффективная теплопроводность слоя шихтовых материалов, определенная по формуле А. Миснара [3], составила $\bar{\lambda}_{\text{ш}}^{\text{сл}} = 43,48$ Вт/(м·К). Оказалось, что $\bar{\lambda}_{\text{ш}}^{\text{сл}} > \bar{\lambda}_{\text{ш}}^1$ на 14,18 Вт/(м·К) или на 48,4 %, вероятно повышение происходит за счет переизлучения между поверхностями случайных пустот, образованных металлическим скрапом.

Среднюю теплоемкость как тяжеловесного, так и легковесного лома углеродистой стали (Ст20 и Ст40) при температуре 575 °С по данным [7] примем $\bar{C}_{\text{л}} = 728,5$ Дж/(кг·К), природного газа $\bar{C}_{\text{пг}} = 4004,5$ Дж/(кг·К) и кислорода $\bar{C}_{\text{O}_2} = 1059,5$ Дж/(кг·К). Для извести и кускового кокса при тех же условиях это значение составит [8] соответственно $\bar{C}_{\text{и}} = 864,75$ Дж/(кг·К) и $\bar{C}_{\text{к}} = 850$ Дж/(кг·К). При определении средней теплоемкости шихтовой загрузки $\bar{C}_{\text{ш}}^1$ также воспользуемся правилом аддитивности с учетом данных табл. 2:

$$\bar{C}_{\text{ш}}^1 = 0,01(m_{\text{лл}} \bar{C}_{\text{лл}} + m_{\text{тл}} \bar{C}_{\text{тл}} + m_{\text{и}} \bar{C}_{\text{и}} + m_{\text{к}} \bar{C}_{\text{к}} + m_{\text{пг}} \bar{C}_{\text{пг}} + m_{\text{O}_2} \bar{C}_{\text{O}_2}) = 786,49 \text{ Дж/(кг·К)}. \quad (3)$$

Коэффициент эффективной температуропроводности для загруженного слоя шихтовых материалов

$$\bar{a}_{\text{ш}}^{\text{сл}} = \frac{\bar{\lambda}_{\text{ш}}^{\text{сл}}}{\bar{C}_{\text{ш}}^1 \bar{\rho}_{\text{ш}}} = \frac{43,48}{788,66 \cdot 1489,65} = 37,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (4)$$

Располагая показателями продолжительности плавки (см. табл. 1, 2), определим коэффициент теплоотдачи в объеме шихтовых материалов первой корзины (К-1).

Активный объем слоя шихты, участвующего в теплообмене с продуктами сгорания ПГ составит $V_a' = 39,75 \text{ м}^3$. Этот объем не включает в себя область шихтовых материалов, которая находится под прямым воздействием тепловыделения от дуг.

Тепловыделение в объеме слоя шихты от сжигания ПГ

$$Q_v^{\text{пг}} = \frac{V_{\text{пг}}' \cdot Q_{\text{H, пг}}^{\text{п}}}{V_a' \cdot \tau_1} = \frac{382 \cdot 35223,01}{39,75 \cdot 1020} = 331,86 \text{ кВт/м}^3 \quad (5)$$

Ожидаемый коэффициент теплоотдачи в объеме слоя шихты

$$\alpha_v = \frac{Q_v^{\text{пг}} \cdot 100}{\Delta t} = 316,05 \text{ Вт/(м}^3 \cdot ^\circ\text{С)}, \quad (6)$$

где $\Delta t = 1050$ °С – изменение температуры составляющих шихты за время нагрева первой корзины.

Тепловыделение за счет окисления углерода кокса.

С первой корзиной в печь подают кокс массой $m_{\text{к}} = 1690$ кг, концентрация углерода в котором $C_{\text{с}} = 86,34$ % [8]. Отсюда масса углерода в коксе $m_{\text{с}} = m_{\text{к}} \cdot C_{\text{с}} = 1459,146$ кг.

В активном объеме слоя шихты при равномерном распределении кокса по сечению содержится углерода массой

$$m'_c = m_c \cdot \left(1 - \frac{V_{\text{ш}}}{V'_u}\right) = 1459,146 \cdot \left(1 - \frac{14,96}{54,71}\right) = 1060,15 \text{ кг.} \quad (7)$$

Из массы углерода m'_c при коэффициенте расхода кислорода $\alpha=2,56 - 3,03$ окисляется до CO и CO₂ за счет свободного кислорода газовой среды до 25 % $m^{CO,CO_2}_c = 0,25 \cdot 1060,15 = 265,04$ кг и из этой массы в соотношении 41,67:58,33 % окисляется до CO $m_{CO} = 0,4167 \cdot 265,04 = 110,44$ кг и до CO₂ $m_{CO_2} = 0,5833 \cdot 265,04 = 154,6$ кг, исходя из химического состава дымовых газов, покидающих рабочее пространство ДСП.

Теплота сгорания C до CO составляет $Q^{C-CO}_h = 9295$ кДж/кг и до CO₂ – $Q^{C-CO_2}_h = 32908$ кДж/кг [7].

Тепловыделение в объеме слоя шихты за счет окисления углерода кокса

$$Q^{C-CO,CO_2}_V = \frac{Q^{C-CO}_h \cdot m_{CO} + Q^{C-CO_2}_h \cdot m_{CO_2}}{V'_\alpha \cdot \tau_1} = \frac{9295 \cdot 110,44 + 32908 \cdot 154,6}{39,75 \cdot 1020} = 150,8 \text{ кВт/м}^3, \quad (8)$$

где τ_1 – статистическое время нагрева шихты до усадки.

Теплоотдача в объеме слоя шихты от окисления углерода свободным кислородом

$$\alpha^{C-CO,CO_2}_V = \frac{Q^{C-CO,CO_2}_V}{\Delta t} = \frac{150800}{1050} = 143,62 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}. \quad (9)$$

Тепловыделение в процессе окисления углерода твердым оксидом железа происходит по уравнению $\text{FeO}_{\text{ТВ}} + \text{C} = \text{CO}_{\text{Г}} + \text{Fe}_{\text{ТВ}}$ [9]

По этой реакции около 20 % массы углерода кокса восстанавливает оксид железа $m^{FeO}_c = 0,2 \cdot 1060,15 = 212,03$ кг.

Тепловыделение в слое шихты за счет окисления углерода кокса оксидом железа

$$Q^{FeO-C}_V = \frac{m^{FeO}_c \cdot Q_{FeO-Fe}}{V'_\alpha \cdot \tau_1} = \frac{212,03 \cdot 13303,25}{39,75 \cdot 1020} = 69,57 \text{ кВт/м}^3, \quad (10)$$

где $Q_{FeO-Fe} = 13303,25$ кДж/кг [10] – тепловой эффект реакции.

Коэффициент теплоотдачи в объеме шихтовых материалов от окисления углерода оксидом железа

$$\alpha^{FeO-Fe}_V = \frac{Q^{FeO-Fe}_V}{\Delta t} = \frac{69570}{1050} = 66,26 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}. \quad (11)$$

Тепловыделение в объеме слоя шихты в результате окисления (угара) железа

$$Q_{Fe} = m'_{FeO} \cdot Q_{Fe-FeO}, \text{ кДж}, \quad (12)$$

где $Q_{Fe-FeO} = 5005$ кДж/кг – тепловой эффект образования FeO [10];

m'_{Fe} – масса угара железа в период нагрева железосодержащих компонентов шихты первой корзины $m'_{Fe} = 0,01(m_{\text{лл}} + m_{\text{мл}}) \cdot y = 0,01 \cdot 7500 \cdot 6,3 = 4725$ кг, где y – угар железа при нагреве массы первой корзины, 6,3 % (см. табл. 1).

Тепловыделение в объеме слоя шихты за счет угара железа.

$$Q^{Fe-FeO}_V = \frac{Q_{Fe}}{V'_\alpha \cdot \tau_1} = \frac{4725 \cdot 5005}{39,75 \cdot 1020} = 583,27 \text{ кВт/м}^3. \quad (13)$$

Коэффициент теплоотдачи в объеме слоя шихты за счет окисления железа

$$\alpha^{Fe-FeO}_V = \frac{Q^{Fe-FeO}_V}{\Delta t} = \frac{583270}{1050} = 555,5 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}. \quad (14)$$

Суммарный коэффициент теплоотдачи в объеме слоя шихты

$$\Sigma \alpha_V = \alpha^{ПГ}_V + \alpha^{C-CO,CO_2}_V + \alpha^{FeO-Fe}_V + \alpha^{Fe-FeO}_V = 1081,43 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}. \quad (15)$$

Таким образом, анализ тепловой работы и материальный баланс плавки стали марки 35ГС на ДСП-120 позволил оценить объем шихты в рабочем пространстве, активно участвующей в теплообмене с продуктами сгорания природного газа и кислорода, с учетом ее насыпной плотности. Расчет теплофизических свойств (коэффициент теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности) выполнен с использованием действительных расходов, загружаемых в печь компонентов и слоя шихты, с учетом порозности. Предложенная методика расчета коэффициента теплоотдачи в объеме слоя шихты с использованием действительных теплофизических свойств шихты в проверочном расчете показала надежную сходимость.

Список использованных источников

1. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции // Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинформация». 2013. № 3. – С. 72-78.
2. Alam M., Naser J., Brooks G., Fontana A. Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process // Metallurgical and materials transactions b. 2010. Vol. 41B. Pp. 1354-1367.
3. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: «Мир». 1968. – 464 с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.
5. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. – М.: Машгиз, 1962. – 247 с.
6. Металловедение: учебник. Т.1 / И.И. Новиков и др.; под общей ред. проф. В.С. Золоторевского. – М.: Издательский дом «МИСиС», 2009. – 496 с.
7. Казанцев Е.И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
8. Подготовка руд и доменный процесс. Том 1. Справочник / под ред. Е.Ф. Вегмана. – М.: Металлургия, 1989. 495 с.
9. Tomson M. The Total a. Free Energies of Formation of the Oxides of 32 Metals, New York, 1942.
10. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. – М.: «Металлургия», 1967. – 792 с.

УДК 536.423.1

Ю. М. Голдобин, Н. С. Поротников

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ОБ ИСПАРЕНИИ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЫ КАПЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В ИНЕРТНОЙ СРЕДЕ

Аннотация

На основе кинетического уравнения и полученной скорости испарения одиночной капли определены текущая и начальная функции распределения частиц по радиусам для автомобильного режима испарения полидисперсной системы капель жидкого топлива в инертной среде. Получены автомобильные параметры системы, уравнение для расчета доли неиспарившегося к текущему моменту времени топлива и изменения температуры среды в процессе испарения капель.

Ключевые слова: испарение; капли; жидкое топливо; полидисперсность; автомобильные параметры; функция распределения.